

**EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE LOS RECUBRIMIENTOS CADMIO,
CROMO Y NÍQUEL PARA LA PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DE
COMPONENTES AERONÁUTICOS**

ALEJANDRA PEDRAZA JARAMILLO

ANDRÉS FELIPE SERNA MARÍN

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

DIRECTOR:

PhD. JOSÉ LUIS TRISTANCHO REYES

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2018

Pereira, Noviembre 2018

Nota de aceptación:

Firma del Director de Proyecto

DEDICATORIA

A Dios por permitirme concluir esta etapa de mi vida.

A mis padres Edwin y Beatriz Elena, a quienes debo todo lo que soy y podré ser, gracias por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional. A mi hermano Santiago, quien siempre será para mí orgullo y motivación. A toda mi familia, quienes fueron pilar fundamental en este proceso, y les estaré siempre agradecida.

Alejandra Pedraza Jaramillo

A mis padres Martha Liliana Marín y Luis Orlando Serna que con todo su esfuerzo, cariño, dedicación y motivación día a día, hicieron que lo que antes se veía imposible ahora es una realidad, a mi hermana Maritza Serna que siempre ha sido mi compañera de vida y un gran ejemplo para mí.

Andres Felipe Serna Marín

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a nuestro director de tesis, Dr. José Luis Tristanco, por sus apreciados y relevantes aportes, críticas, comentarios, sugerencias y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

A las personas que conforman el grupo CECEND quienes nos brindaron el espacio y los recursos para culminar esta investigación, de igual manera a la Facultad de Ingeniería Mecánica, docentes y directivos, en especial a los docentes que han hecho parte de nuestra formación como profesionales aportando sus conocimientos y experiencias.

Y por último a la universidad tecnológica de Pereira que, como institución, nos formó como profesionales íntegros y nos preparó para afrontar retos laborales de la mejor manera.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1. MARCO TEÓRICO	12
1.1 AERONAVE DE COMBATE A-37B	12
1.2 TREN DE ATERRIZAJE	13
1.3 CORROSIÓN	14
1.3.1 TIPOS DE CORROSIÓN	15
1.4 RECUBRIMIENTO METÁLICO	17
1.4.1 INMERSIÓN EN METAL FUNDIDO	18
1.5 AMBIENTES CORROSIVOS	18
1.5.1 AMBIENTES ATMOSFÉRICOS	18
1.5.2 AMBIENTES ENTERRADOS	19
1.5.3 AMBIENTES LÍQUIDOS	20
1.5.4 AMBIENTES A ALTAS TEMPERATURAS	21
1.6 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS	22
1.6.1 CURVAS DE POLARIZACIÓN O EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL	22
1.6.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (LPR)	23
1.7 ACERO AISI 4130	25
1.8 RECUBRIMIENTO A BASE DE CADMIO	25
1.9 RECUBRIMIENTO A BASE DE CROMO Y NÍQUEL	26
2. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTOS	27
2.1 PROBETAS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA ELECTROQUÍMICA Y MEDIO ELECTROLÍTICO	27
2.1.1 PROBETAS	27
2.1.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN CELDA ELECTROQUÍMICA	29
2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL-MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS	33
2.2.1 CURVAS DE POLARIZACIÓN O EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL	34
2.2.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (LPR)	34
2.2.3 NOMENCLATURA DE ENSAYOS	35
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	37
3.1 RESULTADOS OBTENIDOS	37

3.1.1 CURVAS DE POLARIZACIÓN O EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL.....	37
3.1.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (LPR).....	42
3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
4.CONCLUSIONES	50
5.RECOMENDACIONES	51
6.BIBLIOGRAFÍA.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aeronave A-37B Fuerza Aérea Colombiana	13
Figura 2. Tren de aterrizaje aeronave A-37B.....	14
Figura 3. Diagrama de Tafel.....	23
Figura 4. Diagrama de resistencia a la polarización lineal.....	23
Figura 5. Probetas de acero AISI 4130 recubiertas con cromo, níquel y cadmio.....	28
Figura 6. Área de contacto de la probeta con el electrolito.....	28
Figura 7. Plano celda electroquímica vista frontal y tapas.....	29
Figura 8. Plano celda electroquímica vista superior, lateral y base.....	30
Figura 9. Celda electroquímica.....	30
Figura 10. Electrodo de referencia.....	31
Figura 11. Contraelectrodo.....	31
Figura 12. Balanza con salmuera.....	32
Figura 13. Recipiente con salmuera.....	32
Figura 14. Celdas electroquímicas con probetas posicionadas.....	33
Figura 15. Equipo potenciostato-Galvanostato PG-TEKCORR 4.2.....	33
Figura 16. Resultado curvas Tafel	39
Figura 17. Resultado curvas de resistencia a la polarización lineal.....	45
Figura 18. Resultados obtenidos.....	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de recubrimientos.....	30
Tabla 2. Parámetros para el ensayo.....	36
Tabla 3. Nomenclatura de ensayos.....	37
Tabla 4. Resultados Curvas de polarización o extrapolación de Tafel Cromo.....	40
Tabla 5. Resultados Curvas de polarización o extrapolación de Tafel Cadmio.....	40
Tabla 6. Resultados Curvas de polarización o extrapolación de Tafel Níquel.....	41
Tabla 7. Resultados resistencia a la polarización lineal Cromo.....	45
Tabla 8. Resultados resistencia a la polarización lineal Níquel.....	46
Tabla 9. Resultados resistencia a la polarización lineal Cadmio.....	46

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Curvas de extrapolación de Tafel para el recubrimiento de Cromo.....	40
Grafica 2. Curvas de extrapolación de Tafel para el recubrimiento de Cadmio.....	41
Grafica 3. Curvas de extrapolación de Tafel para el recubrimiento de Níquel.....	41
Grafica 4. Curvas de resistencia a la polarización lineal para el recubrimiento de Cadmio.....	45
Grafica 5. Curvas de resistencia a la polarización lineal para el recubrimiento de Cromo.....	46
Grafica 6. Curvas de resistencia a la polarización lineal para el recubrimiento de Níquel.....	46
Grafica 7. Velocidad de Corrosión Vs Tiempo.....	48

INTRODUCCIÓN

La fuerza aérea colombiana cuenta con la aeronave de combate A-37B fabricada por la empresa estadounidense Cessna. Esta aeronave fue adquirida por primera vez para la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), en diciembre de 1978 y en este momento está ubicada en el comando aéreo de combate N° 3 en Malambo, Atlántico. (Lopez, s.f.)

Actualmente la fuerza aérea colombiana al realizar el mantenimiento de la aeronave mencionada anteriormente, efectúa una aplicación del recubrimiento anticorrosivo a los trenes de aterrizaje los cuales tienen como material base el acero AISI 4130, utilizando un proceso por inmersión, el cual consiste en introducir la pieza (tren de aterrizaje) en una mezcla de pintura anticorrosiva a base de cadmio, con el objetivo de proteger los componentes aeronáuticos contra la corrosión, debido a que están expuestos constantemente a las zonas marítimas de Colombia. (Ruge, 2016)

Se ha considerado buscar una alternativa de recubrimiento diferente a la actual, ya que el cadmio es un elemento altamente toxico y está siendo perjudicial para la salud de los operarios encargados de realizar el mantenimiento a los componentes aeronáuticos de la aeronave A-37B. Adicionalmente según el reglamento (UE) N°1 1907/2006 REACH (Registro, evaluación, autorización y la restricción de sustancias y preparados químicos); prohíbe la comercialización o fabricación de productos coloreados con cadmio con un contenido mayor al 0.01 % en peso. (VERHEUGEN, 2009)

De acuerdo con lo anterior se realizaran una serie de ensayos en base a técnicas electroquímicas para evaluar el comportamiento de los recubrimientos a base de cromo y de níquel frente a la corrosión, ya que estos se propone como un remplazo adecuado al Cadmio utilizado actualmente, debido a que no son considerados componentes tóxicos para el ser humano, seguidamente usando

las técnicas de curvas de polarización y resistencia a la polarización lineal, puesto que estas permiten conocer la susceptibilidad a la corrosión y velocidad de corrosión que tendrían estos recubrimientos a analizar.

La realización de este proyecto se basó en 4 capítulos los cuales son descritos a continuación.

Capítulo 1: Se darán a conocer diferentes definiciones y conceptos teóricos necesarios para la comprensión de esta investigación.

Capítulo 2: Se mostrará el procedimiento o metodología detallada que se realizó para desarrollar el proyecto.

Capítulo 3: Se evidencian los resultados obtenidos después de realizar las técnicas electroquímicas resistencia a la polarización y curvas de polarización o extrapolación de Tafel, aplicadas específicamente a las probetas de cromo, cadmio y níquel. También se muestra un análisis de los resultados nombrado anteriormente.

Capítulo 4: Se presentan las conclusiones y recomendaciones a las cuales se llegaron después de analizar y evaluar los resultados obtenidos, así mismos se considera cual es la mejor opción de recubrimiento para reemplazar el recubrimiento que se utiliza actualmente el cual es de cadmio.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 AERONAVE DE COMBATE A-37B

La aeronave A37-B tuvo sus inicios a principios de los años sesenta, partió de la modificación de la aeronave T37B solicitada por la fuerza aérea de estados unidos, la compañía encargada de realizar las modificaciones fue la casa fabricante Cessna; con el paso del tiempo se decidió realizar nuevos cambios los cuales dieron origen a aeronaves como AT37D, A37A, hasta llegar a la A37-B este último como diseño definitivo con características mejoradas, que permitían un excelente desempeño de la aeronave.

Dentro de sus fortalezas encontramos que es el avión de combate más pequeño del mundo, de difícil detección por parte del enemigo; su camuflaje y corta exposición en el momento de entrega del armamento en el blanco lo hacen mortal y sorpresivo; además de ser una aeronave muy versátil y maniobrable, que se ajusta a las necesidades del conflicto.

Usado por trece países en el mundo, esta aeronave ha demostrado ser una herramienta COIN muy versátil a pesar de tener un diseño relativamente sencillo. Un total de 577 de estos aviones fueron fabricados por la Cessna después de 1977, y más de 220 operaron en Latinoamérica.

Los aviones llegaron inicialmente a Colombia en 1978 al Comando Aéreo de Combate No.1, Palanquero, y en 1989, al Comando Aéreo de Combate No. 2, Apiay, pero fueron asignadas definitivamente al Escuadrón de Combate 311 del Comando Aéreo de Combate No. 3, Malambo, desde allí participan en operaciones brindando apoyo a las diferentes Unidades de la Fuerza y en aeródromos civiles a lo largo y ancho de la geografía nacional, ejerciendo misiones de soberanía, control del espacio aéreo y seguridad.

La versatilidad del A-37B le permite tomar como base de lanzamiento múltiples aeropuertos del país militares y civiles del país, optimizando las misiones como interceptor de aeronaves que violan el espacio aéreo colombiano, en la detección, identificación, captura e inmovilización de aeronaves narcotraficantes, permitiendo que en los últimos años se reduzca el uso del espacio aéreo colombiano para actividades ilícitas, además de contribuir a la incautación de toneladas de droga. (Guarin Guarin, s.f.)



Figura 1. Aeronave A-37B Fuerza Aérea Colombiana

Fuente: (*Ruge, 2016*)

1.2 TREN DE ATERRIZAJE

El tren de aterrizaje del avión es uno de los componentes mayores. Absorbe fuerzas de gran magnitud durante el despegue y, sobre todo, durante el aterrizaje. Además del motor, se trata del componente que mayor grado de seguridad y funcionalidad exige con condiciones extremas de uso. Los componentes principales del tren de aterrizaje son el soporte, el cilindro de frenado, los componentes del sistema hidráulico, los elementos de sujeción, los ejes y las ruedas. Para ellos se emplean, en la mayoría de los casos, aleaciones de acero y titanio, y en algunos tipos de aviones, también aluminio. (walter, s.f.)



Figura 2. Tren de aterrizaje aeronave A-37B

Fuente: (Ruge, 2016)

1.3 CORROSIÓN

La corrosión es el deterioro que sufren los metales al ser atacados por los más diversos agentes químicos. También se puede definir como la destrucción o deterioro continuo a través del tiempo de un material debido a una reacción química o electroquímica con el medio ambiente o el microambiente donde se encuentra trabajando u operando el material en cuestión.

Cada material y específicamente para el caso de los metales, se comportan de forma diferente ante cada ambiente o condiciones de exposición. La corrosión se puede manifestar como una película delgada, fina y adherida a la superficie base del metal a la que simplemente mancha y le hace perder brillo, lo cual puede considerarse favorable ya que puede proteger o dificultar la continuación de la acción destructiva del proceso de corrosión.

En otras circunstancias los productos de corrosión forman una capa porosa de mayor espesor que no ofrece ninguna protección y adicionalmente genera unas condiciones de mala apariencia en el

área atacada, para estos casos el proceso de corrosión es continuo y la destrucción no se detiene.
(Ruge, 2016)

1.3.1 TIPOS DE CORROSIÓN

Se clasifica de acuerdo al aspecto del material corroído, se identifican los siguientes tipos:

- Corrosión uniforme: consiste en un ataque homogéneo en toda la superficie. Existe igual penetración en todos los puntos. Se puede calcular la vida útil de los materiales expuestos.
- Corrosión por picadura: el ataque se localiza en puntos aislados de superficies metálicas pasivas y se propaga al interior del metal. En ocasiones por túneles microscópicos. Las picaduras son difíciles de detectar en ocasiones debido a que las pequeñas pueden estar recubiertas por los productos de corrosión.
- Corrosión bajo tensión: ocurre cuando el metal es sometido simultáneamente a un medio corrosivo y a tensión mecánica de tracción. Aparecen fisuras que se propagan al interior del metal hasta que se relajan o el metal se fractura. (Antioquia, 2010)
- Corrosión de dos metales o galvánica: La corrosión galvánica se presenta, cuando dos metales diferentes en contacto o conectados por medio de un conductor eléctrico, son expuestos a una solución conductora.
- Corrosión por agrietamiento: la corrosión por grietas es una forma de corrosión electroquímica localizada que puede ocurrir en las grietas y bajo superficies recubiertas donde sea posible que existan soluciones estancadas.

- Corrosión intergranular: es un ataque corrosivo localizado en y/o adyacente a las fronteras de grano de una aleación. En condiciones comunes si un metal se corroe de manera uniforme, las fronteras de grano solo serán un poco más reactivas que la matriz. Sin embargo, en otras condiciones, las regiones de la frontera de grano pueden ser muy reactivas, y causar corrosión intergranular que provoca la pérdida de resistencia de la aleación inclusive la desintegración en las fronteras de grano.
- Corrosión por erosión: puede definirse como la aceleración en la velocidad del ataque corrosivo a un metal debido al movimiento relativo de un fluido corrosivo, y de la superficie metálica. La corrosión por erosión se caracteriza por la aparición en la superficie metálica de huecos, valles, picaduras, hoyos redondeados y otras configuraciones de daño de la superficie metálica que suelen ocurrir en la dirección del flujo del fluido corrosivo.
- Daño por cavitación: este tipo de corrosión por erosión resulta de la formación y el colapso de las burbujas de aire o de las cavidades llenas de vapor en un líquido cerca de una superficie metálica.
- Corrosión por desgaste: ocurre en interfaces entre materiales bajo carga expuestos a vibración y deslizamiento. En el caso de la corrosión por desgaste de metales, los fragmentos metálicos entre las superficies en frotamiento se oxidan y algunas películas de óxido se desprenden por la acción de desgaste.
- Fugas selectivas: Las fugas selectivas corresponden a la eliminación preferencial de un elemento de una aleación sólida mediante un proceso de corrosión. El ejemplo más común de este tipo de corrosión es la deszinificación, en la cual ocurre la fuga selectiva de zinc a partir de cobre en latones. También se producen procesos similares en otros sistemas

de aleaciones tales como las pérdidas de níquel, estaño y cromo a partir de aleaciones de cobre, hierro de hierro fundido, níquel de aleaciones de acero, y cobalto a partir de estelita. (Ruge, 2016)

1.4 RECUBRIMIENTO METÁLICO

El fin más frecuente e importante de los recubrimientos metálicos es el de proteger a otros metales de la corrosión. Otros usos son lograr un conjunto de propiedades diferentes que no están reunidas en un metal solo o fines decorativos. La mayoría de los metales, expuestos a la acción del ambiente, sufren transformaciones fisicoquímicas que los degradan, reducen su utilidad y llegan a destruirlos. Los fenómenos que originan estos cambios se agrupan en el concepto de corrosión, o, con mayor amplitud, en el de deterioro de materiales. En la mayor parte de los casos, la aplicación de un recubrimiento metálico tiene por finalidad proteger de la corrosión a otro metal más barato. Para ello, lo más eficaz es elegir como protector a otro situado en la serie de fuerzas electromotrices por encima del que se va a proteger. En el caso particular del hierro, p. ej., son el aluminio, el zinc y, en la mayoría de las condiciones, el cadmio los que mejor lo protegen. Se dice en estos casos que el metal que forma el recubrimiento se sacrifica en beneficio del hierro, y tiene poca importancia que queden sin recubrimientos pequeñas zonas: poros, rayas, bordes de chapas finas.

Puede ocurrir, sin embargo, que por exigencias de dureza, de resistencia al desgaste mecánico, de aspecto decorativo o de conductividad eléctrica, se prefiera un metal (níquel, estaño, cobre, plata, oro) o aleación (acero inoxidable, metal monel, etc.), que aun estando por debajo del hierro en la serie de fuerzas electromotrices presente, por su tendencia a la pasivación, mayor resistencia a la corrosión. Entonces es importante que el recubrimiento no presente poros ni otros defectos que dejen el hierro al descubierto, pues, al comportarse éste anódicamente con respecto al que forma el recubrimiento, la corrosión en dichas zonas sería más intensa que si no estuviera recubierto. En

el valor protector influyen, por consiguiente, el método de aplicación y el espesor de la película protectora. (Agudelo Bedoya, 2016)

1.4.1 INMERSIÓN EN METAL FUNDIDO

Consiste en sumergir el metal que se va a recubrir en otro metal de menor punto de fusión, en estado fundido. La aplicación más importante la constituye el recubrimiento de objetos, chapas, barras y alambres de acero con zinc, y el recubrimiento de acero, cobre y latón con estaño. En menor extensión se aplica también por este procedimiento el aluminio, para el que resulta necesario efectuar el recubrimiento en atmósfera de hidrógeno. En este proceso hay que regular la temperatura y el tiempo para lograr cierta disolución del metal que se va a recubrir, en el metal fundido, con objeto de que se forme una capa intermedia de aleación de ambos metales que dé lugar a una buena adherencia del recubrimiento, pero el espesor de la capa de aleación no debe ser tan grande que origine una película frágil. Los espesores que se obtienen por este procedimiento son relativamente gruesos comparados con los que se obtienen por otros métodos, y presentan menos poros. Sin embargo, tanto el espesor como la uniformidad del recubrimiento son difíciles de regular. (Universidad Tecnológica de Pereira, s.f.)

1.5 AMBIENTES CORROSIVOS

Los problemas de corrosión más importantes ocurren en tres tipos de ambientes: atmosféricos, enterrados, líquidos, altas temperaturas.

1.5.1 AMBIENTES ATMOSFÉRICOS

La atmósfera terrestre está compuesta básicamente por Oxígeno (20%), Nitrógeno (78%) y de otros elementos en una proporción muy pequeña (Argón, Hidrógeno, vapor de Agua etc.) de esta composición el oxígeno (el más abundante) tiene una importancia relevante para las reacciones

involucradas en el proceso de corrosión de los materiales, específicamente en la generación del óxido en la superficie de los mismos. Sin embargo no solo estos elementos gaseosos pueden encontrarse en nuestra atmosfera, elementos en su estado líquido como el agua, en forma de lluvia o humedad o en su estado sólido como el polvo y sales en los ambientes marinos también pueden estar presentes y afectar significativamente el proceso de corrosión, adicionalmente otros factores como la temperatura ambiente y elementos incorporado por la actividad humana pueden afectar también, así pues los ambientes atmosféricos pueden clasificarse en:

- Atmosferas Industriales
- Atmosferas marinas
- Atmosferas rurales
- Atmosferas tropicales
- Atmosferas Interiores

Generalmente el uso de recubrimiento y la selección de materiales son los métodos más efectivos y comúnmente usados para el control de corrosión cuando un material es expuesto a ambientes atmosféricos.

1.5.2 AMBIENTES ENTERRADOS

Los ambientes enterrados pueden ser descritos en términos de las características de los suelos donde se encuentran. Los suelos típicamente están compuestos por arena, sílice, arcilla, rocas y otros materiales en pequeñas proporciones, la corrosividad de estos dependen de las características químicas y físicas de ellos, su humedad o contenido de agua presente, su resistividad eléctrica, concentración de aire y de la presencia o no de bacterias. Una característica fundamental de estos

ambientes es que pueden variar, significativamente, a poca distancia en la misma zona geográfica, igualmente varia en el tiempo y por efectos estacionales. El estudio de los ambientes enterrados tiene particular importancia en el diseño de los sistemas de protección catódica, como método de control de la corrosión.

1.5.3 AMBIENTES LÍQUIDOS

La inmersión de un material en un medio líquido bien sea en una zona industrial o una atmosfera natural puede presentar una amplia variedad de ambientes corrosivos. En ambientes naturales, la inmersión en agua de mar es la más común, esta posee un alto contenido de sales corrosivas y baja resistividad eléctrica lo que la hace particularmente corrosiva. La actividad biológica presente en el agua de mar también es un factor importante, la generación de Fouling y otros micro-organismos que se acumulan en las superficies de los materiales pueden favorecer los procesos corrosivos. En ambientes industriales, hay una amplia variedad de procesos con líquidos que abarcan desde aquellos donde intervienen líquidos no corrosivos, como el agua desmineralizada, hasta los altamente corrosivos con líquidos ácido o alcalinos. En este tipo de ambiente también debemos incluir los sistemas de almacenamiento y transporte de líquidos (tanques y tuberías), aquí factores como: la configuración física, la velocidad del fluido, el tipo de flujo, las condiciones operacionales de presión y temperatura y la actividad microbiológica, entre otros, pueden influir significativamente.

Aquí la selección de material y el diseño de las instalaciones son básicos para el control de la corrosión, así como, la modificación de la composición química de los líquidos para variar su corrosividad y para controlar la actividad micro-bacteriana.

1.5.4 AMBIENTES A ALTAS TEMPERATURAS

Generalmente se considera que un ambiente está a alta temperatura cuando esta sobre los 650° Centígrados, a esta temperatura la presencia de un medio líquido no es necesario para que ocurran las reacciones de reducción y oxidación típicas de los procesos corrosivos. La oxidación en un ambiente a alta temperatura envuelve los siguientes aspectos:

- Pérdida de electrones.
- Cargas predominantemente positivas.
- El oxígeno no está necesariamente presente en la reacción.

Para que los materiales tengan un buen desempeño en ambientes con altas temperaturas, deben formar óxidos protectores con las siguientes características:

- Físicamente estables, es decir no deben fundirse.
- Baja volatilidad, es decir no deben evaporarse.
- Buena integridad Mecánica.
- Capacidad de adherirse a un sustrato.
- Velocidad de corrosión baja.

La reducción en los ambientes con alta temperatura se dan por la presencia de gases reductores producto del proceso de combustión, como en Hidrógeno (H_2), Monóxidos de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO_2) y Sulfuro de Hidrógeno (H_2S), estos gases pueden acelerar el proceso

de corrosión y producen daños internos al material, muy destructivos que muchas veces son difíciles de identificar a simple vista. (Jimenez, 2011)

1.6 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS

En términos simples, las pruebas de corrosión electroquímica proporcionan datos iniciales sobre el comportamiento a la corrosión de los materiales mediante la generación de energía eléctrica a partir de reacciones químicas o la producción de reacciones químicas mediante la introducción de energía eléctrica. (Bassett, 2014)

Velocidad de corrosión: (cinética de corrosión) muestra que tan rápido o que tan lento se corroe un material, se obtiene al determina el valor de la densidad de corriente (I_{corr}) ya sea por resistencia a la polarización lineal o por espectroscopia de impedancia electroquímica. (Tristancho, Pena, & Anaya, 2007)

1.6.1 CURVAS DE POLARIZACIÓN O EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL

El potencial de un metal, que se hace actuar como un electrodo en una celda electroquímica, además de poderse modificar en función del tiempo, cambia de la misma forma, en función de la densidad de corriente que se le aplique (procedimiento potencióstato). En el procedimiento galvánico se mantiene constante la densidad de corriente aplicada.

Para la obtención de las curvas de polarización se aplica un barrido de potencial de ± 20 mV respecto al potencial de corrosión y se observa los datos derivados de las polarizaciones tanto anódica como catódica. El barrido del potencial se grafica en función del logaritmo de la densidad de corriente, lo anterior se muestra en la figura.

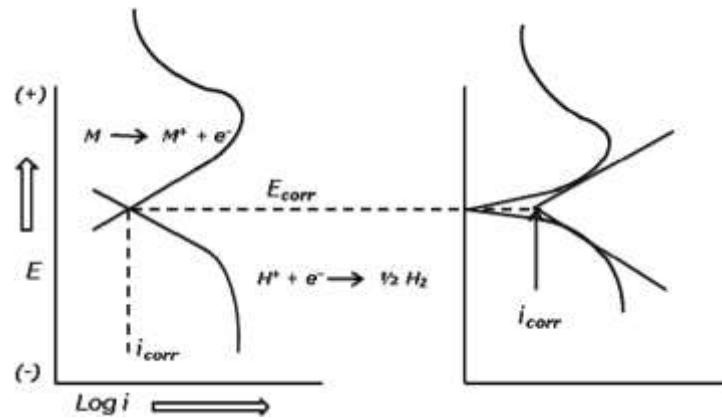


Figura 3. Diagrama de Tafel

1.6.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL)

Es una de las técnicas de monitoreo continuo más comúnmente usadas en la determinación de la velocidad de corrosión y se puede definir como la resistencia que ofrece un material a la oxidación durante la aplicación de un potencial externo. Presenta la ventaja de requerir solo la aplicación de pequeñas polarizaciones que no alteran la superficie del electrodo de trabajo (material de prueba). La resistencia a la polarización (R_p) se determina calculando la pendiente de la región lineal de la curva en el diagrama. Ver figura 4.

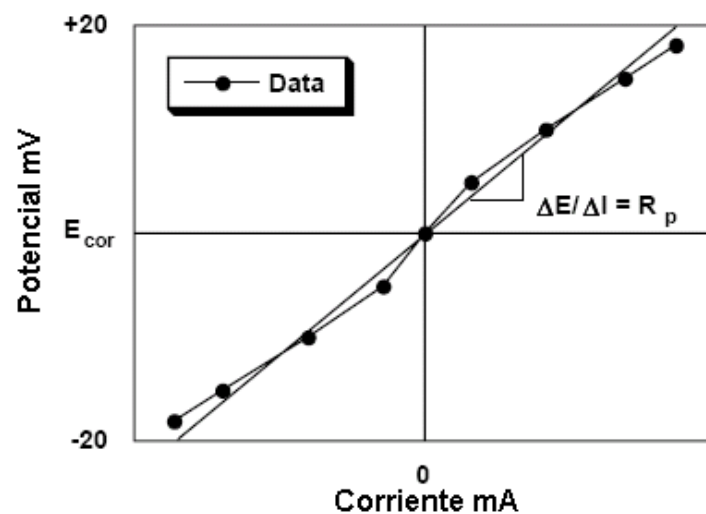


Figura 4. Diagrama de resistencia a la polarización lineal

El ensayo consiste en la aplicación, mediante un potencióstato, de un potencial de ± 20 mV, alrededor del potencial de reposo con una velocidad de barrido de 0,1 mV/seg y obtener una respuesta de corriente lineal con el voltaje.

Con la resistencia a la polarización (R_p) y las pendientes de tafel obtenidas de las curvas de polarización, la densidad de corriente de corrosión puede ser determinada mediante el uso de la ecuación de Stern-Geary.

$$I_{CORR} = \frac{\beta}{R_p}$$

Donde,

$$\beta = (b_a b_c) / [2,303(b_a + b_c)]$$

I_{CORR} = densidad de corriente de corrosion ($\mu A/cm^2$)

R_p = resistencia a la polarizacion ($\Omega.cm^2$)

b_a = pendiente anodica de Tafel (V)

b_c = pendiente catodica de Tafel (V)

La velocidad de corrosión puede determinarse de la siguiente manera:

$$V_{CORR} = 3.27 \times 10^{-3} (I_{CORR} PE / \rho)$$

Donde,

V_{CORR} = velocidad de corrosion (mpy)

$PE = \text{peso equivalente del material (g)}$

$\rho = \text{densidad del material (g/cm}^3\text{)}$

(Tristancho, Pena, & Anaya, 2007)

1.7 ACERO AISI 4130

El tren de aterrizaje de la aeronave A37-B de la Fuerza Aérea Colombiana, está fabricado en un material base el cual es el acero AISI 4130.

Es un acero de baja aleación que contiene cromo y molibdeno como agentes de refuerzo. El acero tiene buena resistencia, dureza, soldabilidad y maquinabilidad. Es una aleación versátil con buena resistencia a la corrosión atmosférica y una resistencia razonable hasta alrededor de 315 °C. Muestra buenas combinaciones generales de fuerza, dureza y resistencia a la fatiga.

Este acero de baja aleación encuentra muchas aplicaciones como piezas forjadas en la industria aeroespacial, de petróleo y gas. (Ningshing, s.f.)

1.8 RECUBRIMIENTO A BASE DE CADMIO

Los recubrimientos electrolíticos de cadmio se emplean para proteger al hierro y al acero contra la corrosión. El cadmio es un material anódico y actúa como ánodo de sacrificio en la corrosión, protegiendo al metal ferroso de base aún en aquellos casos en los que quede expuesto debido a la presencia de poros o picaduras en el cadmio. Tradicionalmente los recubrimientos de cadmio electrolítico se han aplicado sobre hierro o acero mediante el uso de soluciones de cianuro alcalino pero, en los últimos años, las inquietudes y reglamentos medio-ambientales han fomentado un mayor uso de soluciones de sulfato de cadmio ácido, cloruro de cadmio neutro y fluoborato de cadmio ácido.

El cadmio es altamente tóxico y la protección de la salud, la seguridad y el medioambiente están eliminando los usos que no son imprescindibles. No obstante, aún quedan aplicaciones críticas, normalmente relacionadas con la industria aeroespacial, donde las propiedades únicas de los recubrimientos de cadmio electrolítico, como por ejemplo su resistencia a la corrosión, su lubricidad intrínseca, su ductilidad, su conductividad eléctrica y su baja resistencia de contacto, hacen necesario que continúe el uso de los recubrimientos de cadmio.

El uso del cadmio ha sido prohibido por las normas internacionales, como la REACH (Regulation on Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) en Europa y la USEPA (US Environmental Protection Agency), esto ha llevado a buscar tecnologías alternativas de sustitución, como baños orgánicos, baños de sales fundidas, procesos Ion Vapor Deposition de Aluminio, depósito en solución acuosa, etc. (Torres Gonzalez, 2016)

1.9 RECUBRIMIENTOS A BASE DE CROMO Y NÍQUEL

Los recubrimientos con alto porcentaje de Cr se consideran materiales de recubrimiento duros prometedores para beneficiar a un número de aplicaciones industriales debido a su alta dureza, buena resistencia al desgaste ya la corrosión, y resistencia a la oxidación a alta temperatura. Además, los recubrimientos de níquel, por otra parte, se utilizan ampliamente como recubrimientos protectores contra la oxidación y la corrosión. Se espera que la combinación de estos dos tipos de materiales para conducir al desarrollo de recubrimientos con nuevas propiedades del material, que extenderían sus aplicaciones en la industria. La presencia de Cr-Ni en los recubrimientos ha mejorado las propiedades mecánicas de los materiales ya que por su dureza presentan resistencia al desgaste.

Se han evaluado los recubrimientos con alto contenido de estos dos materiales, en el recubrimiento de Ni se ha evidenciado que la morfología de los recubrimientos es regular y compuesta principalmente por cristales en forma de poliedros. Presentaron un mejor comportamiento frente a la corrosión-erosión y mayor microdureza, esto se debe a que, con el aumento de la velocidad de rotación, los cristales de níquel se hicieron más pequeños lo que hace que exista una mejor compactación del recubrimiento.

Así mismo, el cromo en, en forma de recubrimiento, es un material ampliamente utilizado en la protección de piezas de uso industrial y en la recuperación de piezas desgastadas, lo que ha permitido su durabilidad, este material presenta buena resistencia a la corrosión en ambiente salino sin embargo el recubrimiento con Cr genera imperfecciones en la capa, lo cual puede ser mitigado por el Ni ya que los recubrimientos con Ni presentan una superficie lisa. (Ruge, 2016)

2. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTOS

2.1 PROBETAS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA ELECTROQUÍMICA Y MEDIO ELECTROLÍTICO

2.1.1 PROBETAS

Para la realización de las pruebas de curvas de polarización y resistencia a la polarización lineal se usaron tres probetas de acero AISI 4130 como material base del tren de aterrizaje de la aeronave A37-B de la fuerza aérea, cada probeta con diferentes recubrimientos metálicos los cuales son Cobre, Níquel y Cadmio. Las probetas con sus respectivos recubrimientos fueron suministrados por la teniente Andrea Carolina Gómez Ruge de la fuerza aérea colombiana, dichos recubrimientos fueron realizados por medio de la técnica inmersión en caliente.



Ni



Cd



Cr

Figura 5. Probetas de acero AISI 4130 recubiertas con Cromo, Níquel y Cadmio

El área de contacto que se usó de cada probeta fue de $314,159 \text{ mm}^2$

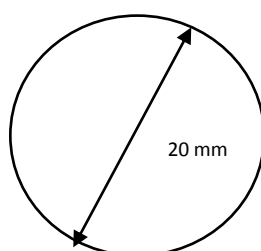


Figura 6. Área de contacto de la probeta con el electrolito

Para realizar las pruebas correctamente se deben conocer algunas propiedades químicas de los recubrimientos las cuales se usaron para introducir en el potenciostato-galvanostato, equipo que se usó para realizar las pruebas, en la tabla **xx** se anexan las diferentes propiedades consideradas.

Tabla 1. Propiedades de recubrimientos.

PROPIEDADES	CADMIO	CROMO	NIQUEL
Número atómico	48	24	28
Densidad (g/ml)	8,65	7,19	8908

Masa atómica (g/mol)	112,40	51,996	58,71
Valencia	2	2,3,4,5,6	2,3
Estado de oxidación	+2	+3	+2
Electronegatividad	1,7	1,6	1,8

2.1.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA ELECTROQUÍMICA

Las celdas utilizadas para el desarrollo de la investigación fueron diseñadas por los estudiantes que llevan a cabo el proyecto utilizando el programa de diseño Solidworks, la forma de la celda fue sugerida por el director de proyecto y para determinar la dimensiones correctas, se utilizaron como base las celdas electroquímicas hay en el laboratorio CECEND , estas están fabricadas en un material acrílico con el fin de que su costo no sea muy elevado y que este material al no ser metálico no interfiera con el resultado de las pruebas, se decidieron hacer dos celdas para realizar las pruebas con mayor agilidad.

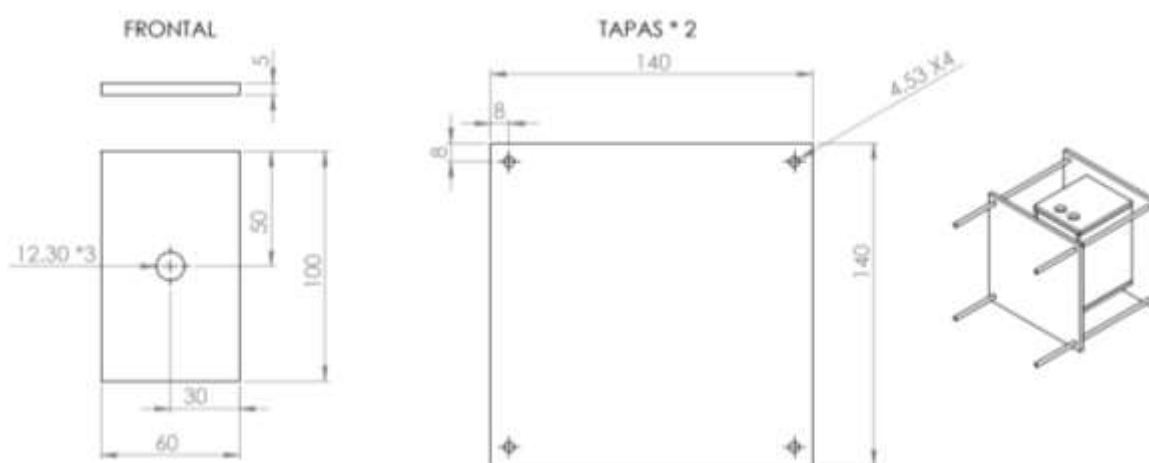


Figura 7. Plano celda electroquímica vista frontal y tapas

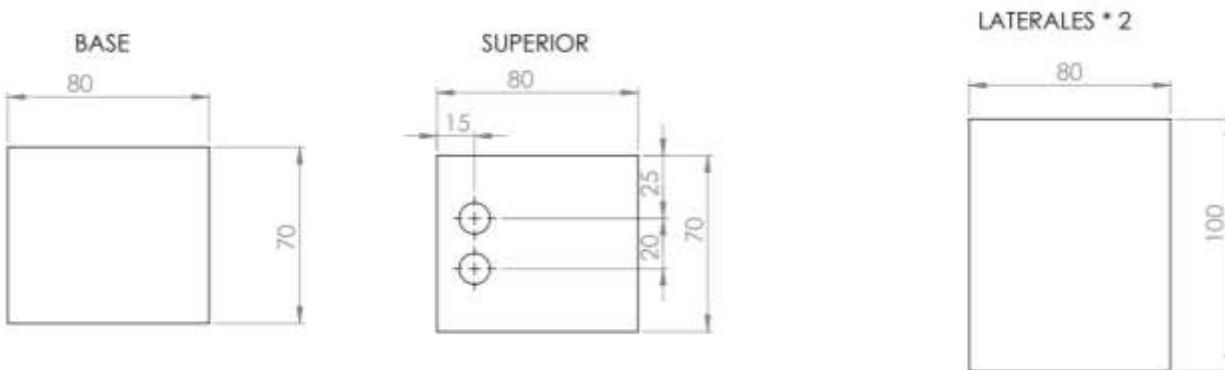


Figura 8. Plano celda electroquímica vista superior, lateral y base

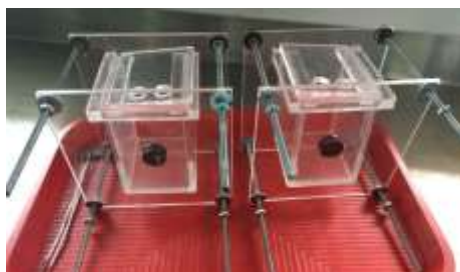


Figura 9. Celda electroquímica

Para la celda diseñada se usaron tres electrodos.

- **Electrodo de trabajo:** El electrodo de trabajo usado en la investigación fue cada una de las probetas con sus respectivos recubrimientos cromo, níquel y cadmio.
- **Electrodo de referencia:** El electrodo de referencia utilizado fue un alambre de alta pureza de platino.



Figura 10. Electrodo de referencia.

- **Contraelectrodo:** El contraelectrodo que se uso fue de grafito.



Figura 11. Contraelectrodo.

- **Electrolito:** Se empleó salmuera, para obtener la solución salina que se necesitaba para el proyecto, se usó un recipiente con capacidad de 1000ml el cual se llenó de agua y se hizo la mezcla con 37g de sal marina luego se procedió a batir hasta que no se encontraran partículas de sal marina.



Figura 12. Balanza con salmuera



Figura 13. Recipiente con salmuera

- **Posicionamiento de las celdas:** Al tener la mezcla lista, se procedió a ubicar las probetas en las celdas, teniendo en cuenta que este es uno de los procedimientos más importantes previo al inicio del ensayo ya que el área predeterminada debe quedar en total contacto con la solución y esta no debe de presentar fugas o algún tipo de goteo porque esto presentaría un cambio en el momento de obtener los resultados. Al ubicar las probetas y para comprobar que estas no tuvieran fugas se llenaron de agua de la llave y se dejaron un lapso de 5 minutos para verificar que no existiera fuga.



Figura 14. Celdas electroquímicas con probetas posicionadas

2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL- MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS

Para obtener los datos de cada prueba y poder calcular la velocidad de corrosión para cada recubrimiento, se utilizaron dos tipos de pruebas electroquímicas, resistencia a la polarización lineal (RPL) Y curvas de polarización (TAFEL) las cuales se realizaron en el transcurso de una semana, cada dato tomado tiene una diferencia de 24 Horas. Para poder realizar estas pruebas se utilizó un potenciostato-Galvanostato PG-TEKCORR 4.2 USB, el cual fue suministrado por el director del trabajo de grado, quien explicó el uso de este.



Figura 15. Equipo potenciostato-Galvanostato PG-TEKCORR 4.2

Parámetros suministrados al programa computacional “PG 01X18E1CE6” para la realización de las técnicas electroquímicas se encuentran en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros para el ensayo

Parámetros para el ensayo			
Material	NIQUEL	CROMO	CADMIO
Peso Equivalente [g eq]	0.29	0.26	0.56
Densidad [g/Dm3]	8.91	7.14	8.65
Área[Cm2]	132.73	132.73	132.73
PH agua	6.7	6.7	6.7

2.2.1 CURVAS DE POLARIZACIÓN O EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL

Para realizar la técnica electroquímica se consideraron los siguientes parámetros.

- Sensibilidad 10nA
- Velocidad de escaneo 10 mV/s

2.2.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL)

Para realizar la técnica electroquímica se consideraron los siguientes parámetros.

- Sensibilidad 10nA
- Velocidad de escaneo 1.0 mV/s

2.2.3 NOMENCLATURA DE ENSAYOS

A cada uno de los ensayos se le asignó un nombre, especificando las condiciones o variables que los rigen, en este caso la técnica electroquímica usada, recubrimiento de la probeta y tiempo de exposición. Así, por ejemplo, el ensayo TNi00 corresponde a la prueba de curvas de polarización o extrapolación de TAFEL realizada al recubrimiento de Níquel el cual tiene como símbolo Ni expuesto a la salmuera a las 0 horas. En la tabla x se encuentran los diferentes ensayos realizados en condiciones específicas a los tres recubrimientos analizados.

Tabla 3. Nomenclatura de ensayos

ENSAYO	CURVAS DE POLARIZACIÓN O EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL	RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL	PERIODOS DE EXPOSICIÓN [horas]				
			0	24	48	72	96
TNi00	X		x				
TNi24	X			x			
TNi48	X				x		
TNi72	X					x	
TNi96	X						x
RPLNi00		X	x				
RPLNi24		X		x			

RPLNi48		X		x		
RPLNi72		X			x	
RPLNi96		X				x
TCr00	X		x			
TCr24	X			x		
TCr48	X				x	
TCr72	X					x
TCr96	X					x
RPLCr00		x	x			
RPLCr24		x		x		
RPLCr48		x			x	
RPLCr72		x				x
RPLCr96		x				x
TCd00	X		x			
TCd24	X			x		
TCd48	X				x	
TCd72	X					x
TCd96	X					x

RPLCd00		X	X				
RPLCd24		X		X			
RPLCd48		X			X		
RPLCd72		X				X	
RPLCd96		X					X

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante dos ensayos electroquímicos, resistencia a la polarización lineal y curvas de polarización o extrapolación de TAFEL. Para obtener la velocidad de corrosión de los recubrimientos de cromo, níquel y cadmio, expuestos a una mezcla de salmuera en un 3,7 %, durante un periodo de tiempo de una semana por cada recubrimiento.

3.1.1 CURVAS DE POLARIZACIÓN O EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL

Los resultados obtenidos para cada recubrimiento mediante el ensayo en diferentes periodos de exposición del material a la salmuera se presentan en las tablas 4,5 y 6 (Constantes de TAFEL anódica (β_a) y catódica (β_c)). Estos datos fueron indispensables obtenerlos ya que teniendo los valores de las constantes, estas se introdujeron en el programa para realizar el análisis de resistencia a la polarización línea ya que estas técnicas van ligadas.

Tabla 4. Resultados Curvas de polarización o extrapolación de Tafel Cromo

Ensayo	anódica β_a [mV/dec]	catódica β_c [mV/dec]
TCr00	23,53	-24,6
TCr24	58,45	-53,45
TCr48	76,36	-79,22
TCr72	74,37	-77,51
TCr96	26,32	-23,023

Tabla 5. Resultados Curvas de polarización o extrapolación de Tafel Cadmio

Ensayo	anódica β_a [mV/dec]	catódica β_c [mV/dec]
TCd00	20,35	-16,83
TCd24	27,01	-26,07
TCd48	44,45	-40,55
TCd72	57,85	-52,3
TCd96	45,95	-43,99

Tabla 6. Resultados Curvas de polarización o extrapolación de Tafel Níquel

Ensayo	anódica β_a [mV/dec]	catódica β_c [mV/dec]
TNi00	34,69	-32,68
TNi24	45,63	-40,99
TNi48	46,5	-42,83
TNi72	42,16	-41,05
TNi96	10,81	-10,39

En la figura 16 se muestra un ejemplo de la gráfica arrojada por el programa computacional “PG 01X18E1CE6”, al aplicar la técnica de curvas de extrapolación de Tafel o curvas de polarización.

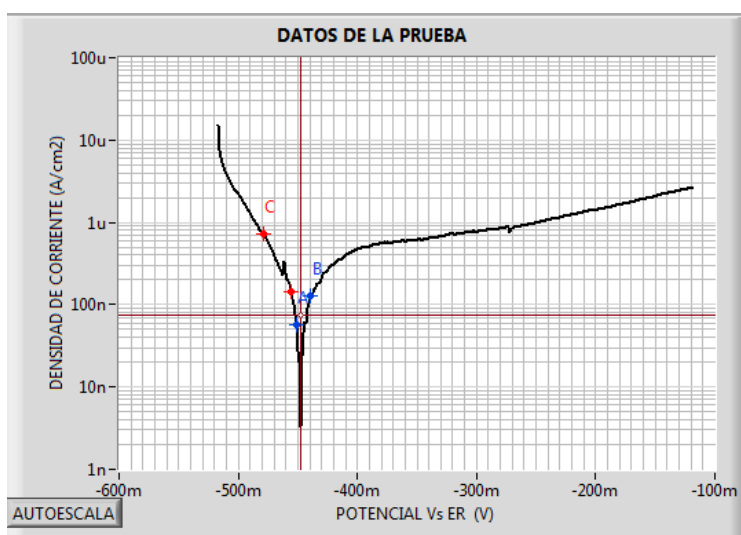
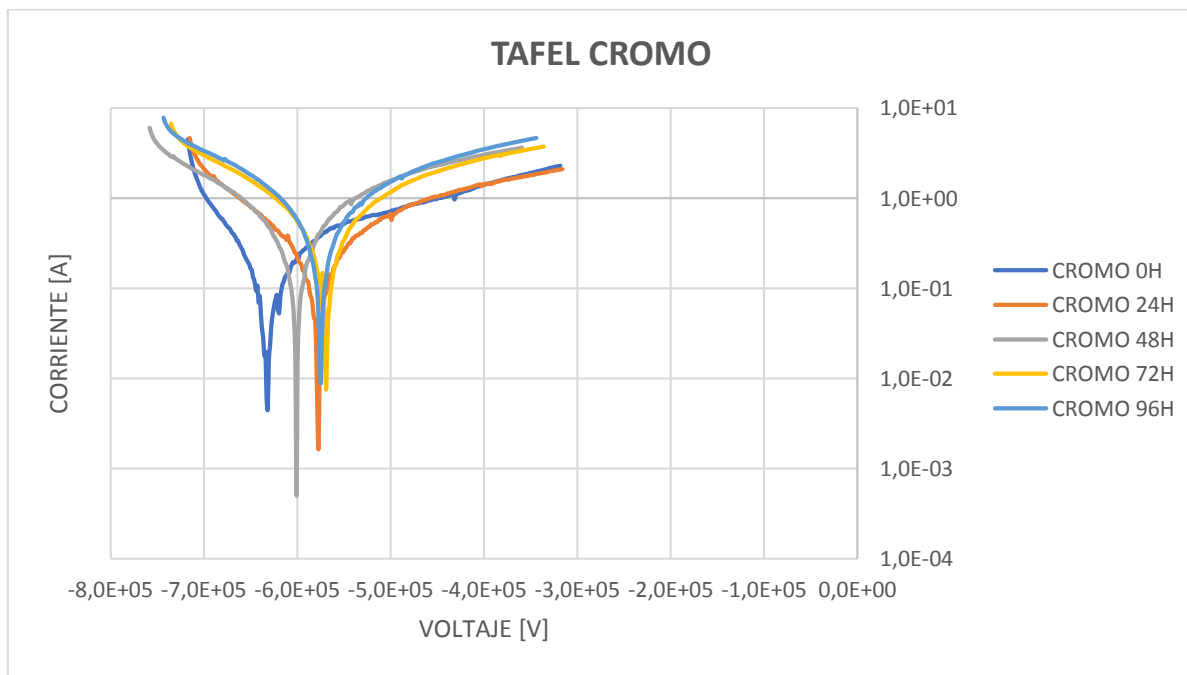
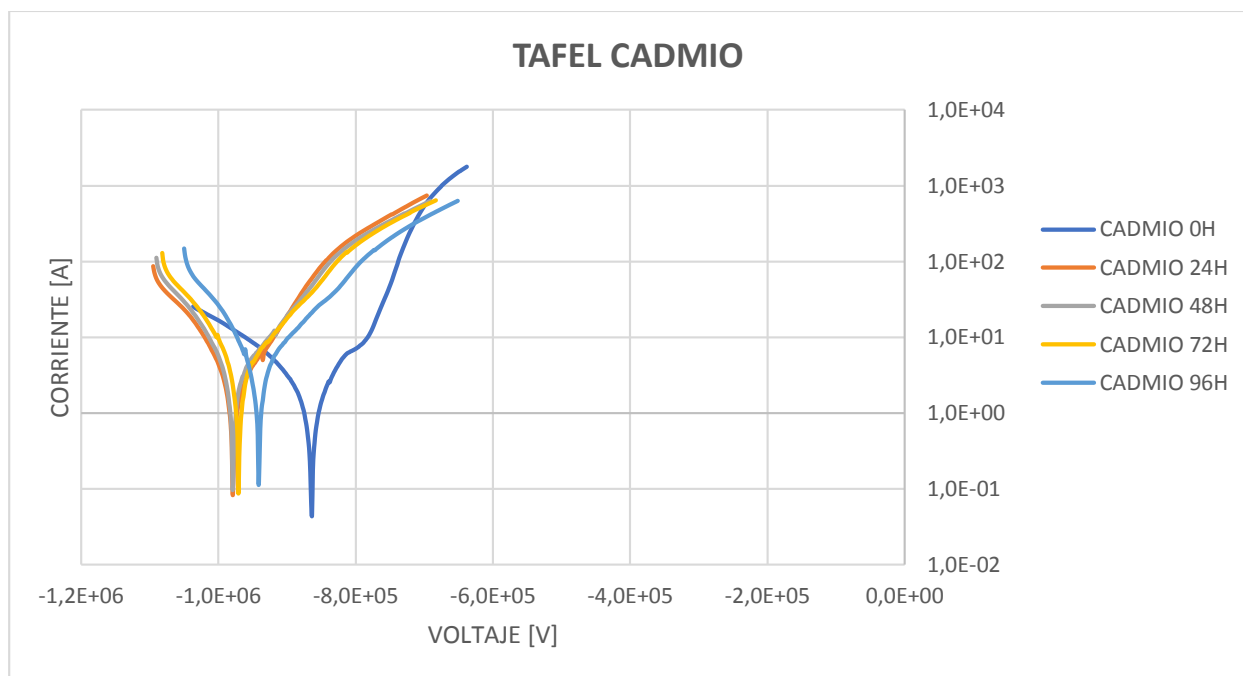


Figura 16. Resultado curvas Tafel

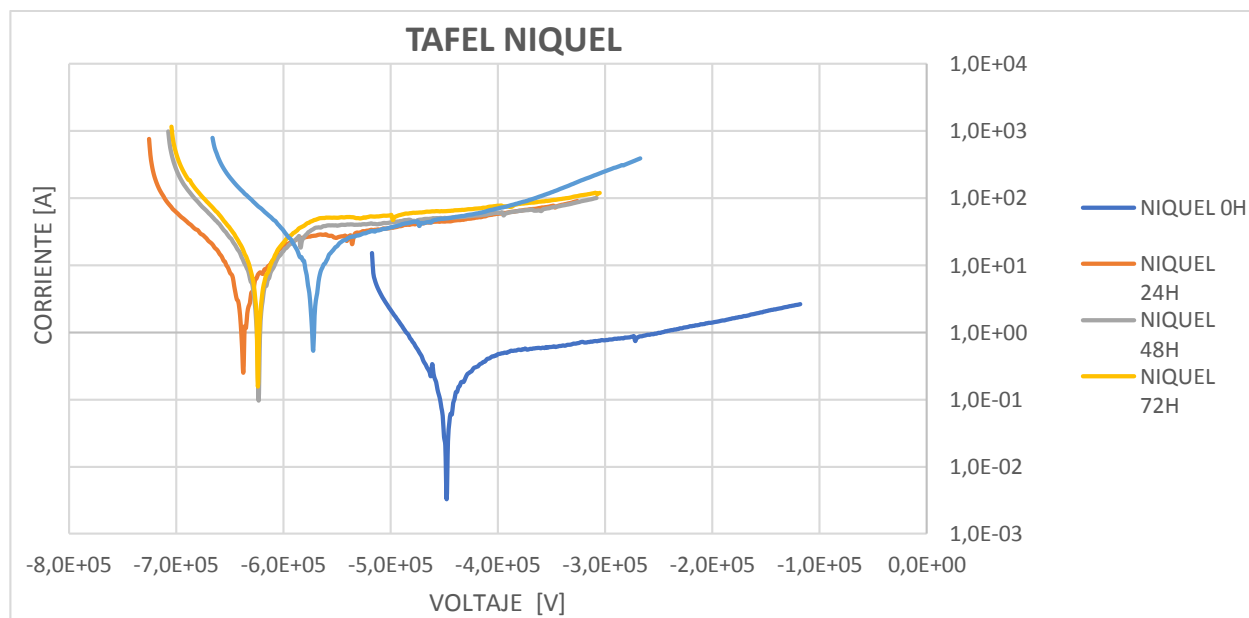
En las gráficas 1,2 y 3 se puede observar la recopilación de la información obtenida por medio del programa computacional para cada recubrimiento durante un tiempo de exposición a la salmuera, se obtuvieron los datos del programa para cada tiempo de exposición y cada recubrimiento, después se agruparon los resultados para cada recubrimiento con el objetivo de graficar en Excel todas las curvas obtenidas y poder comparar los resultados obtenidos en los diferentes tiempos de exposición.



Grafica 1. Curvas de extrapolación de Tafel para el recubrimiento de cromo



Grafica 2. Curvas de extrapolación de Tafel para el recubrimiento de cadmio



Grafica 3. Curvas de extrapolación de Tafel para el recubrimiento de Níquel

3.1.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL (RPL)

En esta sección se muestran los resultados de la técnica electroquímica resistencia a la polarización (R_p) por medio de la cual se pudo obtener: densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) y velocidades de corrosión (V_{corr}).

Para determinar la cinética de corrosión se hizo uso de la ecuación de Stern and Geary que relaciona la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) en mA/cm²) con el valor de resistencia a la polarización (R_p) en Ω.cm²).

$$R_p = \frac{\beta}{I_{corr}}$$

En donde β corresponde a una constante adimensional que se determina a partir de los valores de las curvas de Tafel anódica (β_a) y catódica (β_c), haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{(b_a \cdot b_c)}{[2,303(b_a + b_c)]}$$

La velocidad de corrosión (V_{corr}) está en función de la densidad de corriente de corrosión (I_{corr} (mA/cm²)), del peso equivalente (P.E (g)) y de la densidad del material (ρ (g/cm)), así:

$$V_{corr} = 3,27 * 10^{-3} (I_{corr} P. E / \rho)$$

En las tablas 7,8 y 9 se encuentran consignados los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la técnica resistencia a la polarización lineal a los diferentes recubrimientos de cromo, níquel y cadmio en periodos de exposición de a 24 horas cada una, tomando así 5 pruebas por cada probeta.

Tabla 7. Resultados resistencia a la polarización lineal Cromo

Ensayo	constante de Stern – Geary	Rp [Ω]	Icorr [A]	Vcorr [MPY]
RPLCr00	5,222124657	61.38*10 ³	85.08*10 ⁻⁹	3.01*10 ⁻⁶
RPLCr24	12,12294683	80.74*10 ³	116.13*10 ⁻⁹	4.1*10 ⁻⁶
RPLCr48	16,88313343	55.18*10 ³	305.97*10 ⁻⁹	10.81*10 ⁻⁶
RPLCr72	16,48014361	55.54*10 ³	298.03*10 ⁻⁹	10.53*10 ⁻⁶
RPLCr96	5,357935707	40.13*10 ³	133.51*10 ⁻⁹	4.27*10 ⁻⁶

Tabla 8. Resultados resistencia a la polarización lineal Níquel

Ensayo	constante de Stern – Geary	Rp [Ω]	Icorr [A]	Vcorr [MPY]
RPLNi00	7,306777157	16.21*10 ³	450.76*10 ⁻⁹	14.41*10 ⁻⁶
RPLNi24	9,375971309	1.5*10 ³	6.22*10 ⁻⁶	199.85*10 ⁻⁶
RPLNi48	9,680766729	1.83*10 ³	5.3*10 ⁻⁶	169.48*10 ⁻⁶

RPLNi72	-677,0127487	$6.98 \cdot 10^3$	$6.98 \cdot 10^{-6}$	$223.06 \cdot 10^{-6}$
RPLNi96	2,359893359	$1.28 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$57.46 \cdot 10^{-6}$

Tabla 9. Resultados resistencia a la polarización lineal Cadmio

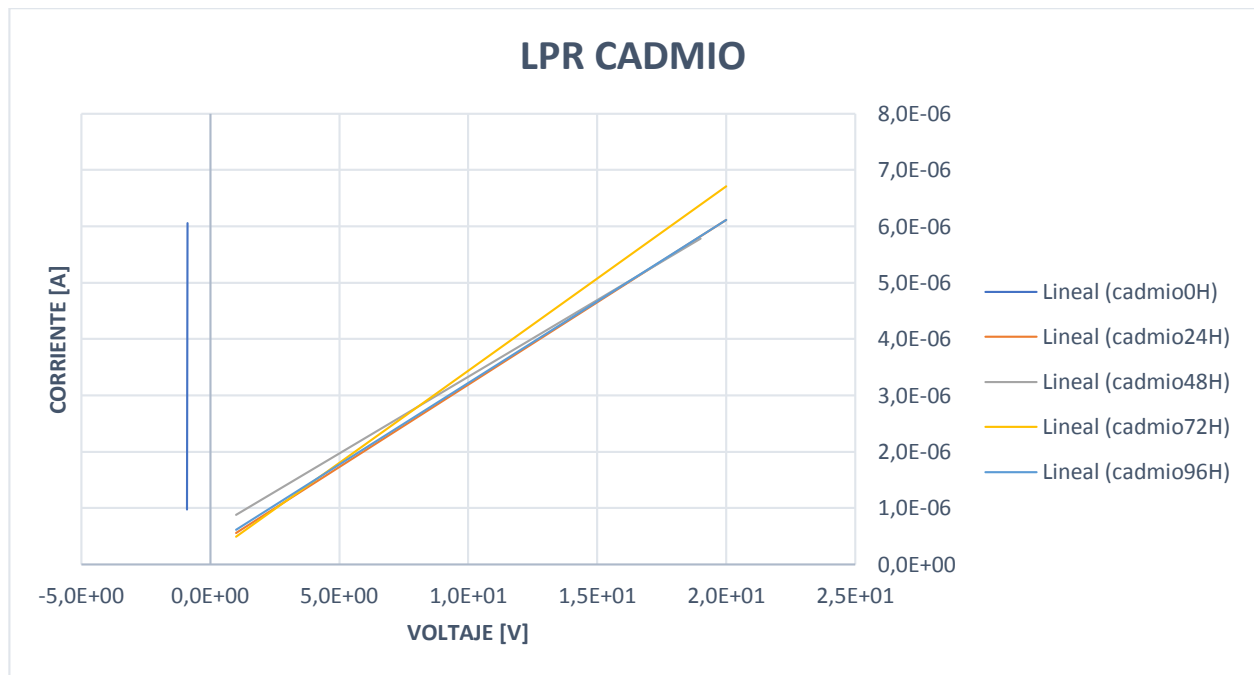
Ensayo	constante de Stern – Geary	Rp [Ω]	Icorr [A]	Vcorr [MPY]
RPLCd00	3,999863826	$12.21 \cdot 10^3$	$327.47 \cdot 10^{-9}$	$20.65 \cdot 10^{-6}$
RPLCd24	5,760242448	$3.19 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$113.36 \cdot 10^{-6}$
RPLCd48	9,207670302	$3.4 \cdot 10^3$	$2.71 \cdot 10^{-3}$	$170.91 \cdot 10^{-3}$
RPLCd72	11,92687349	$2.9 \cdot 10^3$	$4.09 \cdot 10^{-3}$	$257.82 \cdot 10^{-3}$
RPLCd96	9,758715489	$3.34 \cdot 10^3$	$2.92 \cdot 10^{-3}$	$183.99 \cdot 10^{-3}$

Adicionalmente en la figura 17 se muestra un ejemplo de la gráfica arrojada por el programa computacional “PG 01X18E1CE6”, al aplicar la técnica resistencia a la polarización lineal.

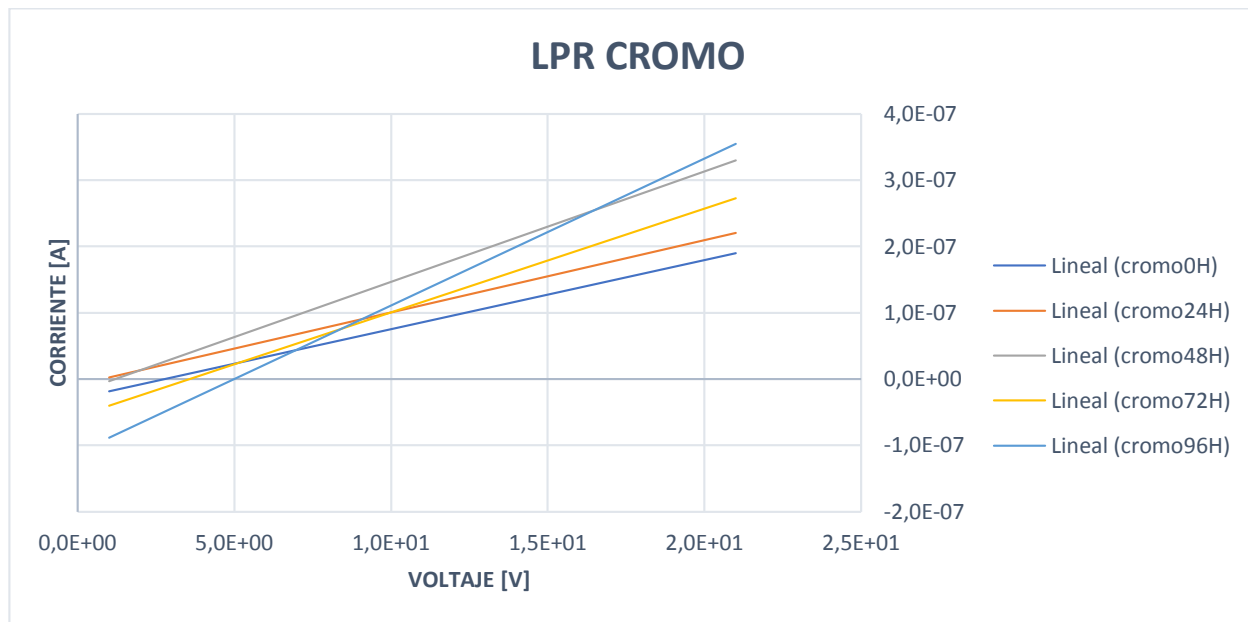


Figura 17. Resultado curvas de resistencia a la polarización lineal

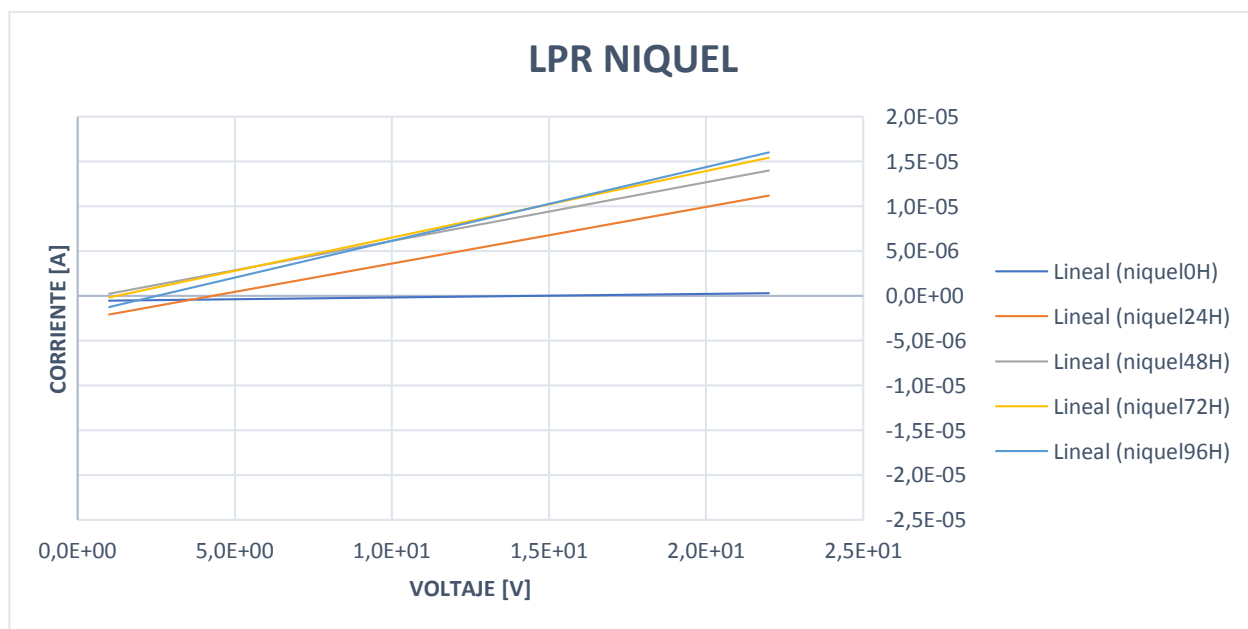
En las gráficas 4,5 y 6 se puede observar la recopilación de la información obtenida por medio del programa computacional para cada recubrimiento durante un tiempo de exposición a la salmuera, se obtuvieron los datos del programa y después se procesaron en Excel con el fin de poder comparar los resultados de cada recubrimiento para diferentes tiempos de exposición.



Grafica 4. Curvas de resistencia a la polarización lineal para el recubrimiento de Cadmio



Grafica 5. Curvas de resistencia a la polarización lineal para el recubrimiento de Cromo



Grafica 6. Curvas de resistencia a la polarización lineal para el recubrimiento de Níquel

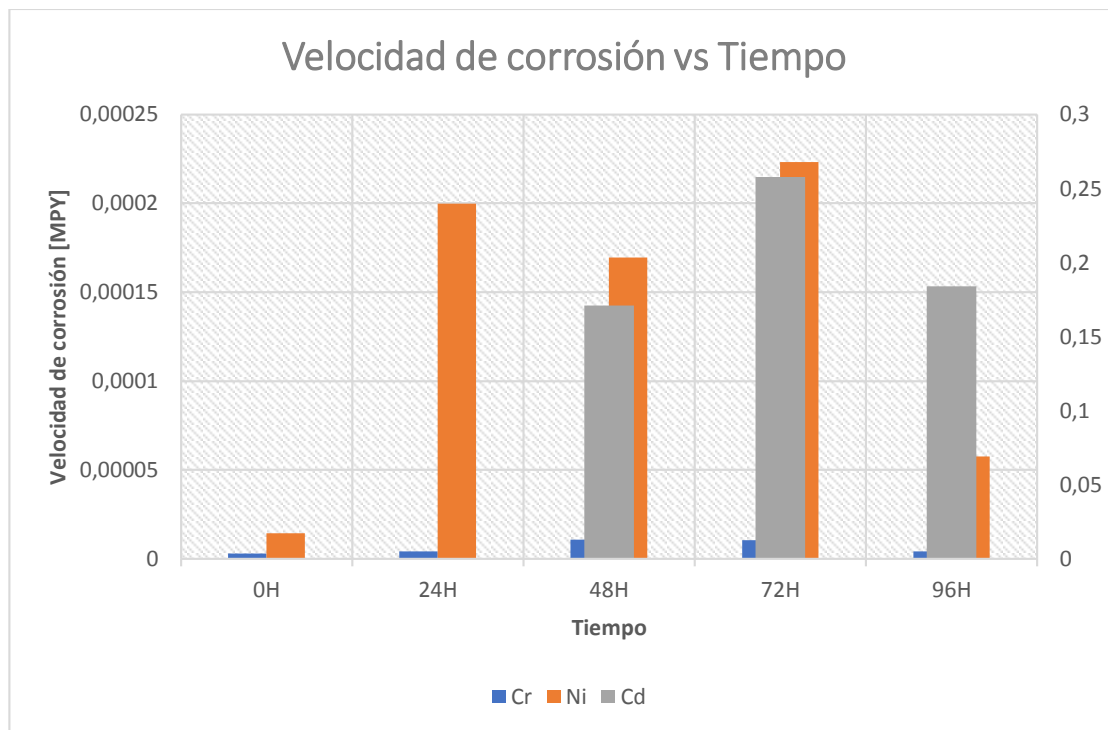
3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de recopilar la información de los resultados obtenidos al realizar las técnicas electroquímicas de resistencia a la polarización lineal y curvas de polarización, a las tres probetas enviadas por la teniente Andrea Carolina Gómez Ruge de la fuerza aérea las cuales tienen como material base acero AISI 4130 y cuenta con varios recubrimientos los cuales son cadmio, cromo y níquel se puede ver que la velocidad de corrosión en los tres recubrimientos aumenta hasta un punto máximo el cual es a las 72 horas, siendo la velocidad máxima para el cromo $10,53 \times 10^{-6}$ MPY, para el níquel $223,06 \times 10^{-6}$ MPY y por ultimo para el cadmio $257,82 \times 10^{-3}$ MPY.

Se puede observar que el aumento en la velocidad de corrosión con respecto al tiempo en el lapso entre las 0 y 24 horas para los recubrimientos de níquel y cadmio presenta un cambio brusco comparado con el cromo ya que en el cromo aumenta de $3,01 \times 10^{-6}$ MPY a $4,01 \times 10^{-6}$ MPY a diferencia del níquel y cadmio ya que pasa de estar en $14,41 \times 10^{-6}$ MPY y $20,65 \times 10^{-6}$ MPY a $199,85 \times 10^{-6}$ MPY y $113,36 \times 10^{-6}$ MPY respectivamente, esto puede ser por las propiedades anticorrosivas que presentan estos elementos, ya que el níquel y el cadmio comparado con el cromo no poseen tanta resistencia a la corrosión.

En la gráfica 7, se realiza una comparación de las velocidades de corrosión obtenidas para cada uno de los recubrimientos en un tiempo total de 96 horas, como se puede observar en ella el cromo es el recubrimiento que presenta menores valores de velocidades de corrosión y el níquel presenta lo mayores valores.

Revisando los datos en las gráficas 4,5 y 6 (LPR) se puede apreciar que la corriente I_{cor} para el cadmio y el níquel es mucho mayor que en el cromo, esto nos muestra que la velocidad de corrosión del recubrimiento Cadmio y Níquel es mucho mayor que las del cromo.



Grafica 7. Velocidad de Corrosión Vs Tiempo

Comparando la información de las tablas 7, 8 y 9 se puede observar que los valores más altos de resistencia se presentan para el cromo siendo el mínimo $40,13 \times 10^3 \Omega$ para una exposición a la salmuera de 96 horas y el máximo valor $80,74 \times 10^3 \Omega$ para una exposición de 24 horas, también se puede observar los cambios en la corriente, teniendo cambios drásticos en cuanto al cadmio y al níquel ya que presentan los mayores valores en un tiempo de exposición de 0 horas y disminuye significativamente en el transcurso del tiempo.

En la gráfica 7 se puede apreciar que el cadmio tiene muy buena resistencia a la corrosión en 0H y 24H, pero esto no se mantiene constante ya que en 48H hacia adelante se puede observar que aumenta de una forma considerable al lado del cromo.



Ni



Cr



Cd

Figura 18. Resultados obtenidos

Como se puede observar en la figura 18. Los valores obtenidos de velocidad de corrosión se corroboran con los efectos resultantes sobre las probetas ya que se evidencia que la probeta de Níquel es la más afectada por la corrosión a diferencia de la probeta de cromo y níquel.

4. CONCLUSIONES

Se analizó y se evaluó el comportamiento de los recubrimientos cromo, níquel y cadmio al estar expuesto a un agente corrosivo como salmuera, utilizando técnicas electroquímicas como resistencia a la polarización lineal y curva de polarización o extrapolación de Tafel.

Los recubrimientos de cadmio y níquel presentan los menores valores de resistencia durante el tiempo de exposición al electrolito (salmuera) en un tiempo total de exposición de 96 horas por lo cual estos recubrimientos presentan los mayores valores de velocidad de corrosión.

Comparando los resultados obtenidos de velocidad de corrosión para los tres recubrimientos analizados se puede concluir que el recubrimiento de cromo es el recubrimiento más oicionado para reemplazar el actual recubrimiento de cadmio para el tren de aterrizaje de la aeronave A37-B de la fuerza aérea colombiana ya que durante los ensayos electroquímicos realizados es el recubrimiento que presento mejores resultados en cuanto a la velocidad de corrosión, pues al compararlo con los otros recubrimientos (cadmio y níquel) este presenta una velocidad menor de corrosión por lo tanto este recubrimiento resiste en gran medida estar expuesto al electrolito empleado el cual fue salmuera.

5. RECOMENDACIONES

Se recomienda profundizar con la información y las pruebas, ya que a pesar de que las pruebas electroquímicas realizadas muestran un resultado coherente y se pudo sugerir un recubrimiento adecuado como opción de reemplazo del recubrimiento actual (cadmio) para el tren de aterrizaje de la aeronave A37-B de la Fuerza Aérea Colombiana , fueron pruebas realizadas con un rango de tiempo muy corto y esto puede ocasionar que se haya dejado de presenciar algunas reacciones tanto del material base como del recubrimiento.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo Bedoya, J. A. (2016). *Evaluacion de la Corrosion por Sales Fundidas en los Recubrimientos Metalicos NiCr y NiCrBSiFe, Mediante Tecnicas Electrowuimicas*. Peeira.
- aires, U. d. (2004). *Trabajos practicos de laboratorio N3 corrosión*.
- Aires, U. D. (2004). *Trabajos practicos de laboratorio N3 de corrosion*. Buenos Aires.
- Antioquia, U. d. (2010). *Aprende en linea*. Obtenido de http://aprendeonline.udea.edu.co/lms/ocw/course/view.php?id=4§ion=2#mas_detalle_sobre_corrosion
- Bassett, A. (Noviembre/Diciembre de 2014). *La Lucha Contra La Corrosion* . Obtenido de https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPND14/bassett_spnd14.html
- Bier, A. (s.f.). *Electroquimica*. Obtenido de <http://www.amco-instruments.com/pdf2/Electroquimica.pdf>
- Casallas Salinas, Q. (s.f.). *conceptos basicos de la corrosion* .
- Corrosion Electroquimica. (2004). *Virtual PRO*.
- Escoba , P. (s.f.). *Tecnicas Electroqimicas para la Medicion de la Velocidad de Corrosion* . Estado de Queretaro.
- Gomez Ruge, C. A. (2016). *Evaluación de un recubrimiento base Cr Ni que actúe como barrera protectora contra la corrosión de componentes aeronáuticos (Tren de aterrizaje de la aeronave A-37B de la Fuerza Aérea Colombiana)*. Pereira.
- Guarin Guarin, D. (s.f.). *FAC MIL*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/30-a%C3%B1os-del-37b>
- Javeriano, Centro de Escritura. (2013). *Normasapa.com*. Obtenido de <http://normasapa.com/formato-apa-presentacion-trabajos-escritos/>
- Jimenez Trujillo, D. (2016). *Determinacion de la Velocidad de Corrosion de un Bonce Comercial en Contacto con una Mezcla de Etanol-Gaolina Mdiante Tecnicas Electroquimicas*. Pereira.
- Jimenez, A. (19 de Diciembre de 2011). *Mantenimiento latinoamericano*. Obtenido de <https://mantenancela.blogspot.com/2011/12/corrosion-y-su-control-medios.html>
- L.L, S. (2010). *Basic Concepts of Corrosion* . ELSEVIER B.V.
- Lopez, P. B. (s.f.). *Fuerza Aerea Colombiana*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/>
- Marulanda A., J. L. (2007). *Ealuacion de la corrosion por sales fundidas mediante tecnicas electroquimicas del acero 21/4Cr-1Mo usado en calderas*. Pereira: Scientia et Technica.
- Ningshing, S.-s. (s.f.). *AISI 4130 75 KSI Aleación de acero para la industria de petróleo y gas*. Obtenido de <http://es.nngsteelgroup.com/Products-show/Alloy-steel/AISI-4130-75-KSI-Alloy-Steel-for-Oil-&-Gas-Industry.html>

- Pavas, E. G. (2008). *APLICACIÓN DE LA ELECTROQUÍMICA EN AGUAS RESIDUALES*. MEDELLIN.
- Peru, P. U. (1988). Principios de las tecnicas electroquimicas en estudios de procesos de corrosion . *Revista de Quimica*.
- R.S , P., M, F., & L, R. (2016). *Galvanic corrosion of aircraft bonded joints as a result of adhesive microcracks*. Lisbon: ELSEVIER.
- Rey Ruiz, A. (2014). Estudio d Corrosion Electroquimica en los bronce de aluminio con niquel(NAB).
- Ruge, A. C. (2016). *Evaluación de un recubrimiento base Cr Ni que actúe como barrera protectora contra la corrosion de componentes aeronauticos(tren de aterrizaje de aeronave A-37B de la fuerza Aerea Colombiana)*. Pereira .
- Sudagar, J., Lian, J., & Sha, W. (2013). *Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings*. Changan: ELSERVIER.
- Torres Gonzalez, J. (2016). *Recublimientos Alternativos Para el Cadmio*. Obtenido de <http://www.cronica.com.mx/notas/2016/976646.html>
- Tristancho, J. L., Pena, D. Y., & Anaya, H. (2007). *Evaluacion de la Corrosion Por Metodos Electroquimicos de un Acero AISI 304H en Presencia del Oxido de Niquel como Hibrido*. Pereira.
- Universidad Tecnologica de Pereira. (s.f.). *Metalografia*. Obtenido de <http://blog.utp.edu.co/metalografia/389-2/>
- VERHEUGEN, C. G. (22 de junio de 2009). Obtenido de <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:164:0007:0031:ES:PDF>
- walter. (s.f.). *walter tools*. Obtenido de https://www.walter-tools.com/es-es/industry_solutions/aerospace/undercarriage/pages/default.aspx